粤北仁化棉花坑铀矿床地下热水地球化学特征及补给来源研究

祁家明,叶松鑫,方晓骐,曹豪杰,唐仕尧
核工业二九〇研究所,广东韶关,512026

内容提要:通过对粤北仁化棉花坑铀矿床地下热水的水文地球化学及地热地质条件分析,探讨了地下热水的形成环境及补给源特征。棉花坑矿床地下热水为 HCO_3^--Ca^{2+}-Na^+型水,其 δD_{V-SMOW} 值为-44.5‰~-40.7‰,$\delta^{18}O_{V-SMOW}$ 值为-6.8‰~-6.4‰,分布于本地雨水线附近,为大气降水成因;热储温度为67.8℃,补给源高程为650~1150 m,循环深度为标高-1250~-660 m,*d-excess*值7.5‰~10.5‰,表明地下热水可更新能力较强,热水径流距离短,水—岩作用较弱;结合粤北花岗岩区地质地貌特征,认为补给源来自矿床东南向的南山一带;地下水深循环是形成矿区地热主因,同时岩体铀矿物放射性蜕变产热可增强地温梯度;地下热水铀含量为40~120 μg/L,呈氧化环境,现今地下热水活动一定程度上继承了成矿期古热水活动特征,对铀矿床的形成具有促进作用;热水循环深度指示矿床深部仍具有非常好的找矿前景。

关键词:水化学、H—O同位素;地下热水;302铀矿床;广东仁化棉花坑

粤北仁化棉花坑(302)铀矿床是我国华南地区最为典型的花岗岩型铀矿床,前人对该矿床的年代学(余达淦,1979;黄国龙等,2010)、地球化学(闵茂中等,1993;胡瑞忠等,2007;陈佑纬等,2009)、微区矿物学(祁家明等,2014,2015)以及矿床成因(杜乐天等,1984;凌洪飞等,2005;商朋强等,2006;沈渭洲等,2010)方面做过诸多深入研究,极大的丰富了华南花岗岩型铀成矿理论,但近年来对棉花坑矿床深部勘查中发现深部含矿带内存在大量地下热水,而前人并无此方面的研究资料。因此,研究棉花坑矿床地下热水的地球化学、补—径—排特征及矿山热害治理都具有重要的科研价值和现实意义。

研究地下热水的水化学特征,可以确定其水质、各离子含量及水化学类型,以便讨论地下热水的水—岩作用及径流过程。而H—O同位素是研究地下热水成因及补给源的理想示踪剂,通过测定水中的H—O同位素,并与当地的大气降水线或全球大气降水平均线进行对比,可判断热水的补给来源;通过H—O同位素的高程效应,可计算出地下热水的补给高程(Larsen et al., 2001; Barragan, 2004; Dos et al., 2007;张保建等,2009,2010;姜规模等,2009;肖汉全,2009;肖琼,2012)。

1 地质背景条件

棉花坑铀矿床位于诸广岩体东南部印支期中细粒二云母花岗岩与燕山期中粒黑云母花岗岩之接触部位,且由NE向棉花坑断裂与NW向油洞断裂所夹持的区域(图1)。铀矿体主要呈似脉状、扁豆状和透镜状产于上述夹持区域中的近SN向断裂蚀变破碎带内。铀矿化垂幅大,自地表(海拔500 m左右)至深部(海拔-647 m)均见有工业铀矿体分布。矿石成分相对简单,矿石矿物以沥青铀矿为主,呈肾状、葡萄状、分散球粒状等形式产出,沥青铀矿形成温度介于250~150 ℃之间,且其Sm-Nd等时线年龄为70±11 Ma(黄国龙等,2010;沈渭洲等,2010)、U-Pb等时线年龄为60±0.5 Ma(Zhong Fujun et al., 2018)。与沥青铀矿伴生的金属矿物主要是黄铁矿,其次为赤铁矿和少量方铅矿等。与铀矿化相关的伴生脉石矿物有褐红色微晶石英、紫黑色萤石、浅粉红色方解石和少量绿泥石、绢云母等。

注:本文为中国地质调查局"全国重要矿集区找矿预测"项目(编号:DD2016005209)、中核集团集中研发项目(编号:地LTD1602)及中国核工业地质局科研项目(编号:201486、201641)的成果。
收稿日期:2018-07-14;改回日期:2018-12-13;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2019.01.013
作者简介:祁家明,男,1987年生,硕士,工程师,主要从事铀矿勘查及科研工作, Email: jiaming_qi@126.com。通讯作者:叶松鑫,男,1983年生,工程师,主要从事铀矿勘查及管理工作, Email: 125382647@qq.com。

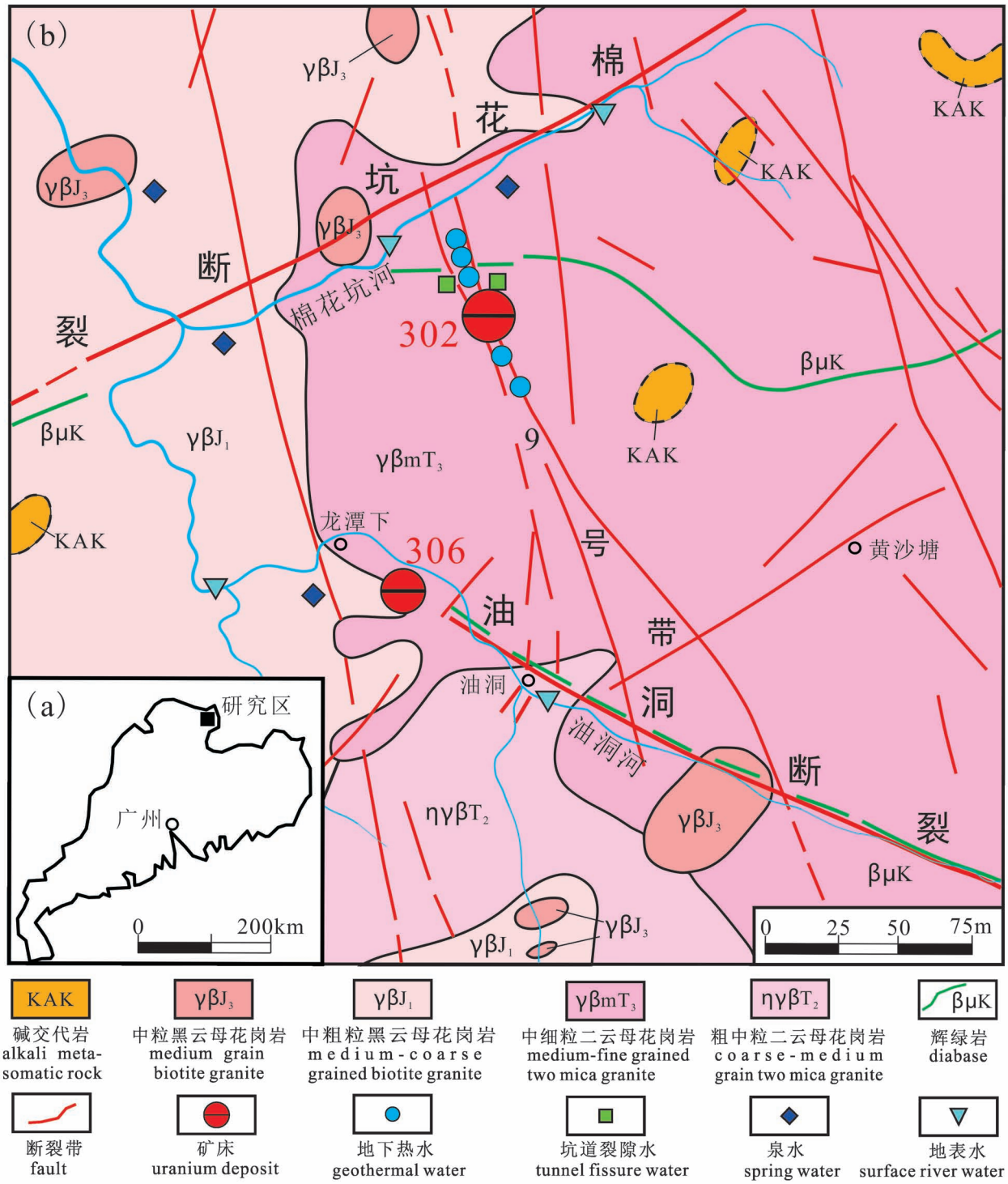


图 1 粤北仁化棉花坑矿区水样取样分布图(据 1∶5 万诸广山岩体南部铀矿地质图)

Fig. 1 Distribution map of water samples in the Mianhuakeng uranium deposit, Renhua, Northern Guangdong (Compiled from 1∶50,000 uranium geological map of the Southern Zhuguang granite)

棉花坑矿床地处气候温暖、潮湿多雨的粤北地区,矿床地貌形态为北东向的带状谷地,地势南高北低。矿区年平均降水量在 970~2244.6 mm,历年年平均气温 16℃。矿区内主要发育油洞河及棉花坑河,流量为 17.07~434.7 L/s。小溪流遍布矿区范围,其流量为 0.9~4.0 L/s,雨季变化较大。矿区地

下水主要通过岩体裂隙、构造破碎带或蚀变带渗入。矿床含水层的富水性中等,而构造破碎带、蚀变带基本不沟通地表水体,属于顶板间接进水型矿床。

矿区内深大断裂为 NE 向棉花坑断裂、NW 向油洞断裂,均为复合压扭性断裂,充填物主要为硅质物、构造角砾岩、破碎花岗岩及少量中基性岩等。近年来在棉花坑矿床 9 号带-150 m 中段进行深部补充勘探中,坑内钻孔大部分出现涌水现象,靠近 37 勘探线附近时,涌水量增加明显,钻孔单位涌水量在 0.019~0.028 L/(s·m),水温 40~46.5 ℃,矿化度高,对该矿床下一步勘查及开采产生较大影响。

2　样品分析及结果

本次研究在棉花坑矿床坑道及地表采集 15 个水样样品用于分析,样品类型主要有-150 m 坑道内钻孔温泉水、坑道壁裂隙水、矿井排水、矿区周围河流水及泉水等,取样分布见图 1。

取样时现场测定了地理坐标、海拔高度、pH 值和温度,样品用不同规格的聚乙烯塑料瓶采集。水样送往东华理工大学核资源与环境教育部重点实验室完成 H—O 同位素及水化学分析。H—O 同位素检测方法和依据为《天然水中氢同位素锌还原法测定》(DZ/T0184.21- 1997)、《天然水中氧同位素二氧化碳——水平衡法测定》(DZ/T0184.21-1997),结果见表 1。水化学分析检验依据为《饮用天然矿泉水检验方法》(GB/T8538-2008),结果见表 2。

3　水样水文地球化学特征

3.1　水样水化学特征

Piper 图解(三角形水质图解法)是用于水化学分类的最普遍方法,且能较直观的揭示阳离子交换等有关的地下水演化现象(漆继红等,2008;陈慧广,2012)。从棉花坑矿区水样水化学分析结果(表 2)及换算成物质的量浓度百分比含量投影到 Piper 三线图(图 2)可看出,地下热水主要为赋存于矿床 7、9 号硅化碎裂带的裂隙水,其水化学类型为 HCO_3^--Ca^{2+}-Na^+型水,pH 值为 7.23~7.88,呈弱碱性,矿化度为 144.80~309.00 mg/L,水中主要离子为 HCO_3^-和 Na^+,阳离子含量为 $n(Na^+)>n(Ca^{2+})>n(K^+)$,阴离子含量为 $n(HCO_3^-)>n(SO_4^{2-})>n(Cl^-)$。

矿区地表水的水化学类型为 HCO_3^--Ca^{2+}-Na^+型水,pH 值多为 6.68~7.11,基本呈中性,矿化度为 25.9~56.15 mg/L 左右。水中主要离子为 HCO_3^-、Na^+、Ca^{2+},阳离子含量从大到小的顺序为 $n(Ca^{2+})>n(Na^+)>n(K^+)$,阴离子含量从大到小的顺序为 $n(HCO_3^-)>n(Cl^-)>n(SO_4^{2-})$。

矿区附近出露的泉水的水化学类型主要为 HCO_3^--SO_4^{2-}-Ca^{2+}-Na^+型水。pH 值多为 6.03~7.11,偏弱酸性,矿化度为 25.40~31.60 mg/L。

表 1 粤北仁化棉花坑矿区水样 H-O 同位素特征表

Table 1 H-O isotopes characteristics of water samples in the Mianhuakeng uranium deposit, Renhua, Northern Guangdong

水样编号	采样位置	水源类型	水温(℃)	$\delta D_{V\text{-}SMOW}$(‰)	$\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$(‰)
MSZ-001	坑道-150m 中段 KZK13-1(工业矿孔)孔口	地下热水	31.0	-40.7	-6.4
MSZ-002	坑道-150m 中段 KZK21-1(工业矿孔)孔口	地下热水	42.0	-44.5	-6.5
MSZ-003	坑道-150m 中段 KZK37-7(工业矿孔)孔口	地下热水	46.5	-44.3	-6.8
MSZ-004	坑道-150m 中段巷壁	坑道滴水	21.0	-31.2	-6.3
MSZ-005	坑道 304m 中段水仓	矿井排水	21.0	-33.4	-5.8
MSZ-006	矿区福利楼旁小河沟	地表水	24.5	-30.1	-5.8
MSZ-007	棉花坑至书楼丘公路边	泉水	18.0	-30.8	-5.7
MSZ-008	棉花坑河上游北 10m	泉水	16.0	-33.7	-5.5
MSZ-009	棉花坑河上游	地表水	23.0	-27.4	-5.9
MSZ-010	棉花坑河与油洞河交汇处	地表水	22.0	-28.4	-5.3
MSZ-011	矿区去油洞村路边水井	泉水	12.0	-31.5	-5.6
MSZ-012	油洞断裂带上	地表水	22.5	-27.7	-5.9
MSZ-013	棉花坑养猪场公路旁	泉水	13.0	-28.2	-5.1
MSZ-014	坑道-150m 中段 KZK39-4(工业矿孔)孔口	地下热水	32.0	-42.1	-6.5
MSZ-015	坑道-150m 中段 KZK35-2(工业矿孔)孔口	地下热水	43.0	-44.2	-6.6

表 2 粤北仁化棉花坑矿区水样水化学特征表

Table 2 Hydrochemical characteristic of water samples in the Mianhuakeng uranium deposit, Renhua, Northern Guangdong

水样编号	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	Cl^-	HCO_3^-	SO_4^{2-}	总硬度	暂时硬度	总矿化度	U	^{226}Ra	pH
	mg/L										μg/L	Bq/L	
MSZ-001	18.19	0.24	1.12	37.41	3.22	153.50	7.87	46.45	46.45	144.80	120	0.026	7.88
MSZ-002	11.40	3.09	1.01	69.40	5.16	195.64	3.94	41.24	41.24	191.80	105	0.017	7.68
MSZ-003	17.36	0.75	2.05	65.27	6.45	213.69	14.79	46.45	46.45	213.50	76	0.022	7.82
MSZ-004	29.34	0.24	2.35	30.60	5.16	129.42	16.81	74.27	74.27	149.20	//	//	7.28
MSZ-005	23.57	0.71	2.34	23.67	3.87	114.37	11.91	61.76	61.76	123.30	//	//	7.21
MSZ-006	4.38	0.61	1.93	3.50	3.87	30.10	8.55	13.41	13.41	37.90	//	//	7.11
MSZ-007	1.24	0.44	1.16	6.90	3.87	12.04	5.76	4.90	4.90	25.40	//	//	6.70
MSZ-008	4.14	0.24	1.84	3.04	3.87	24.08	4.95	11.31	11.31	30.10	//	//	6.69
MSZ-009	1.65	0.51	1.89	3.11	3.87	21.07	5.94	6.21	6.21	27.50	//	//	6.68
MSZ-010	4.54	1.65	6.84	7.55	6.45	45.15	6.54	18.11	18.11	56.15	//	//	6.77
MSZ-011	2.48	0.99	1.14	3.12	3.22	12.04	11.88	10.31	10.31	28.90	//	//	6.03
MSZ-012	3.29	0.61	1.44	2.56	3.61	18.06	5.35	10.71	10.71	25.90	//	//	6.69
MSZ-013	1.24	0.51	1.63	4.88	3.36	24.08	7.92	5.21	5.21	31.60	//	//	7.13
MSZ-014	13.76	0.31	3.97	98.72	2.66	232.00	16.53	35.64	35.64	280.00	40	0.019	7.67
MSZ-015	9.38	0.08	1.16	76.56	1.23	171.80	8.21	23.75	23.75	263.00	92	0.024	7.42

注:“//” 表示低于检出限;Bq(贝克)放射性活度单位,1 Bq 表示 1 s 内有一个放射性元素的原子衰变。

水中主要离子为 HCO_3^-、SO_4^{2-}、Ca^{2+}、Na^+,阳离子含量从大到小的顺序为 $n(Na^+)>2n(Ca^{2+})>n(K^+)$,阴离子含量从大到小的顺序为 $n(HCO_3^-)>n(SO_4^{2-})>n(Cl^-)$。

此外,地下热水的 U 含量为 40~120 μg/L,平均值为 87 μg/L;地下热水 ^{226}Ra 含量为 0.017~0.026 Bq/L,平均值为 0.022 Bq/L。而地表水、泉水及坑道裂隙水的 U、^{226}Ra 则低于检出限。

地表水与泉水由于径流距离短,其水化学成分是非常相近的。而坑道裂隙水成分则处于地表水与地下热水之间,处于过渡状态。地下热水的 HCO_3^- 离子含量及矿化度较地表水及泉水高,表明地下热水接受大气降水补给后在地下径流时间较长,水中各种离子及矿化度相对较高。而地表水及泉水分布在矿区沟谷处,大气降雨直接补给,矿化度因此相对较低。

3.2 水样 H—O 同位素特征

由表 1、图 3 看出,矿区地表水的 δD_{V-SMOW} 值为 -30.1‰~-27.4‰(平均值-28.4‰);$\delta^{18}O_{V-SMOW}$ 值为 -5.9‰~-5.3‰(平均值-5.7‰)。而泉水 δD_{V-SMOW} 值为-33.7‰~-28.2‰(平均值-31.1‰);$\delta^{18}O_{V-SMOW}$ 值为 -5.7‰~-5.1‰(平均值-5.5‰)。坑道裂隙水 δD_{V-SMOW} 值为-33.4‰~-31.2‰(平均值-32.3‰);$\delta^{18}O_{V-SMOW}$ 值为-6.3‰~-5.8‰(平均值-6.1‰)。这说明矿区内泉水及裂隙水的 H—O 同位素值与地表水相接近,均分布于全球雨水线和广东省雨水线附近(图 3),表明区内泉水、裂隙水的补给与大气降水具有相关性,可能来自周边大气降水的就近渗入补给,并未经过远距离运移。

由表 1、图 3 看出,棉花坑矿床-150 m 坑道内钻孔涌出的热水 δD_{V-SMOW} 值为-44.5‰~-40.7‰(平均值-43.2‰);$\delta^{18}O_{V-SMOW}$ 值为-6.8‰~-6.4‰(平均值为-6.6‰)。矿区地下热水 H—O 同位素值与地表水、泉水和坑道裂隙水呈不同分类,地下热水 H—O 同位素数据普遍比其他水样值偏负,且数据分布变化幅度小;地表水 H—O 同位素分布较分散,数据变化幅度较大。但不论是地下热水还是地表水,其 H—O 同位素值均分布在全球及广东省降水线附近,表明地下热水的补给源区也具有大气降水成因。

4 讨论

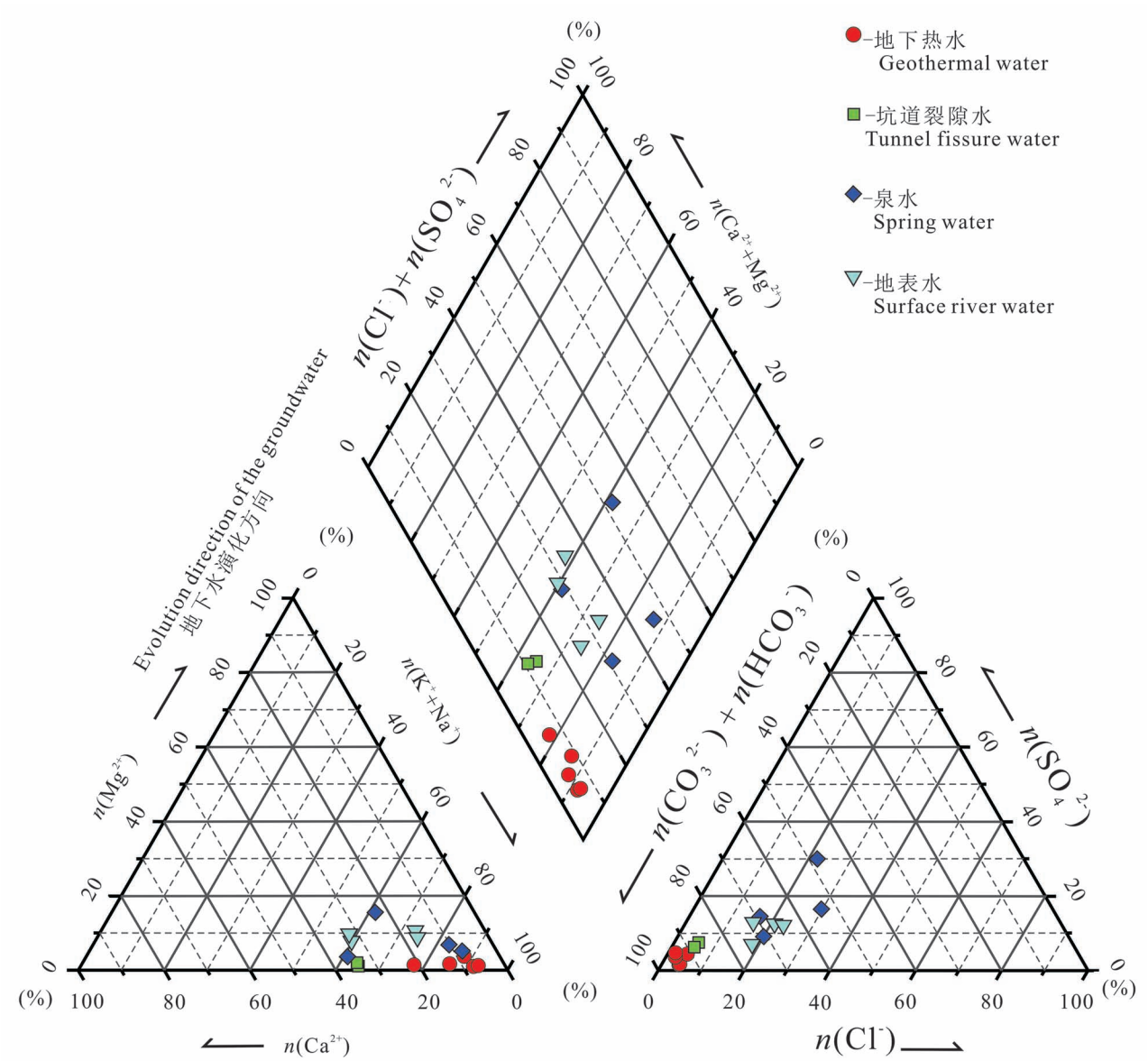


图 2 粤北仁化棉花坑矿区水样水化学 piper 三线图

Fig. 2 Chemical Piper diagram of water samples in the Mianhuakeng uranium deposit, Renhua, Northern Guangdong

4.1　水—岩作用程度探讨

地下热水的 $\delta^{18}O$ 与大气降水线相比,存在着不同程度的正向漂移(Clark et al., 1997;Dilsiz, 2005;肖琼, 2012)。一般来说,地下热水 H—O 同位素的漂移产生的原因是在高温条件下,流体与围岩之间的交换。相比于矿区地表水、泉水及坑道裂隙水来说,区内地下热水径流的深度更大,与围岩的水—岩作用时间更长,导致了其 H—O 同位素发生漂移,表现出其投点分布于广东省降水线以下(图 3)。

矿区内采集的各类地表水、泉水及坑道裂隙水的 H—O 同位素值较为分散(图 3),可能是由于大气降水受地表温度、纬度以及高程、降雨量等影响,其氧同位素在运移过程中会发生漂移,导致大气降水的 δD(‰)和 $\delta^{18}O$(‰)值存在差异(李大通,1988;肖琼,2012)。

但 H—O 同位素漂移程度取决于水—岩比值及水—岩相互作用的强度和水—岩反应时限(马致远等,2008;张保建等,2010),而矿区所处的粤北花岗岩地区各类热液矿物(方解石、石英、萤石等)的 δD_{V-SMOW} 值为 -86.0‰ ~ -23.1‰(平均值 -54.5‰),$\delta^{18}O_{V-SMOW}$ 值为 -4.06‰ ~ 7.3‰(平均值为 0.4‰)(李月湘等,1995;商朋强等,2007);而一般花岗岩岩浆水 δD_{V-SMOW} 值为 -80.0‰ ~ -50.0‰(平均值为 -65‰),$\delta^{18}O_{V-SMOW}$ 值为 6‰ ~ 10‰(平均值为 8‰)。

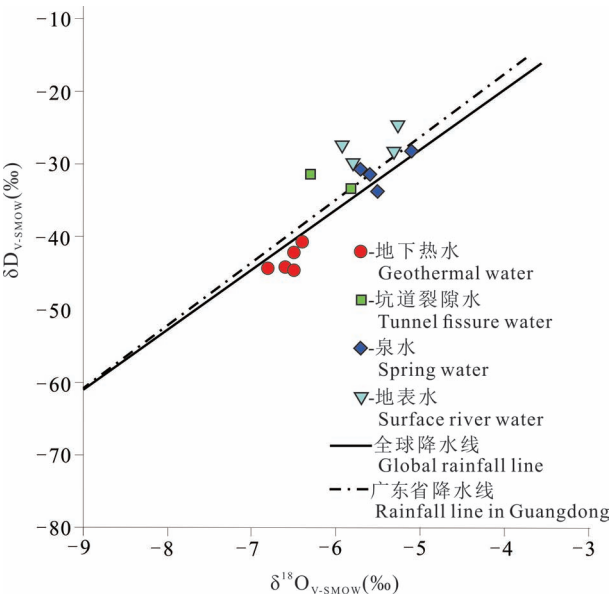


图 3 粤北仁化棉花坑矿区各类型水样 H—O 同位素特征关系图

Fig. 3 Diagram of H—O isotopes characteristic of water samples in the Mianhuakeng uranium deposit, Renhua, Northern Guangdong

由于围岩的 $\delta^{18}O$ 值较高,如果矿区地下热水与围岩发生较强水—岩作用,那么地下热水 ^{18}O 应相比于地表水 ^{18}O 发生较大正漂移,但事实上正好相反,地下热水 $\delta^{18}O$ 值相比于围岩、地表水、泉水及裂隙水偏负,这说明地下热水与围岩发生的水—岩反应作用较弱,在地下运移的时间、距离不长,表明地下热水的补给更新能力强。

同时,根据 Giggenbach (1988) 提出的 Na—K—Mg 三角图解(图 4),棉花坑矿区各类型水绝大部分属未成熟型水,只有一个地下热水样品属部分平衡型水,表明矿区内水—岩作用程度较低,尚未达到平衡状态,溶解作用仍在进行;地表水至地下热水离子成分在图 4 上出现了明显的线性分异,说明随着径流距离的增大,地下热水的水—岩作用程度是逐步提高的。

4.2 地下热水热储温度估算

地下热水井口温度一般都小于地下热储温度,热水在上升到井口过程中温度会逐渐降低,利用地球化学温标法可较精确的估算地下热储温度。由于深部热储中矿物离子达到平衡,地下热水上升至井口的过程中温度下降,但其化学组分含量几乎不变。

计算公式及过程参考《地热资源地质勘查规范》(GB/T 11615-2010) K—Mg 地热温标法,经计算,棉花坑矿区地下热水平均热储温度为 67.8℃,而本文测量的井口水温为 31.0~46.5℃(表 1),两类数值具有较大差距,说明井口温度不可代表热储温度。

4.3 地下热水循环深度估算

地下热水的循环深度可用 K—Mg 地热温标计算的热储温度来估算。估算公式及过程参考(张保建,2011;郝彦珍等,2014)。根据本文所取矿区地表泉水来看,常温平均为 17℃,平均海拔 300 m。而在矿区-100 m 标高坑道壁裂隙滴水为 35 ℃,由此就可计算出棉花坑矿区地温梯度为 4.5 ℃/100m。

可大致计算出棉花坑矿区地下热水最大循环深度为 959~1556 m,平均最大循环深度为 1241 m。所以本区热水最大循环深度大致位于标高-1250~-660 m,平均最大深循环标高为-950 m。

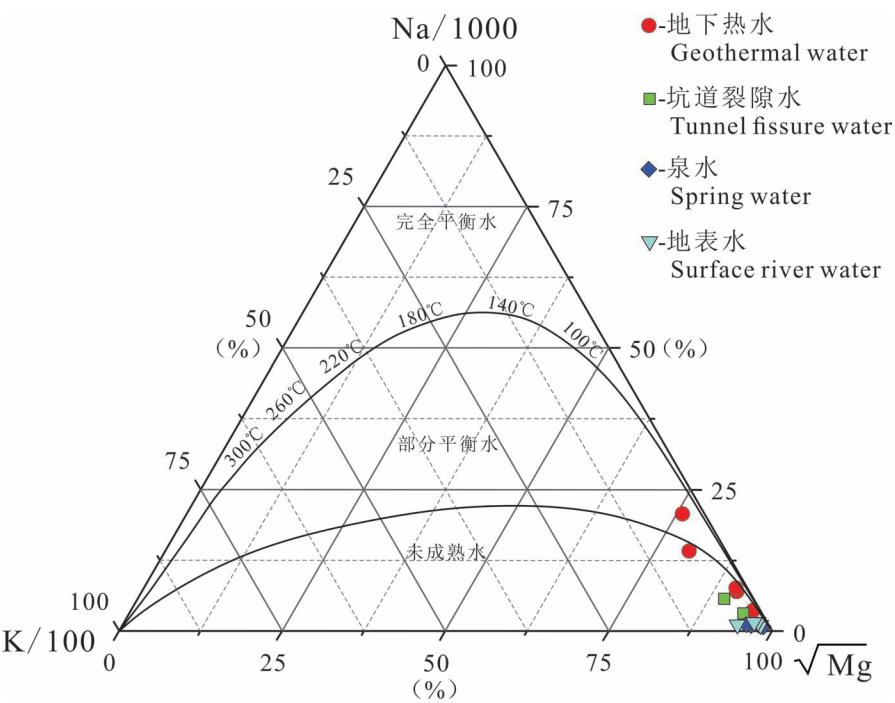


图 4 粤北仁化棉花坑矿区各类型水 Na—K—Mg 三角图解

Fig. 4 Na—K—Mg triangle diagram of water samples in the Mianhuakeng uranium deposit, Renhua, Northern Guangdong

4.4　地下热水可更新能力评价

地下热水可更新能力可用氘盈余($d\text{-}excess = \delta D - 8\delta^{18}O$)来衡量,$d\text{-}excess$反映大气降水在蒸发—凝结过程中的同位素分馏程度(Pastorelli et al., 2001; Marfia et al., 2003),地下水$d\text{-}excess$值实际上是某一区域内水—岩氧同位素交换的总体反映,是地下水运动时间的函数(尹观等,2001;蒲俊兵,2013)。若$d\text{-}excess$值越小,则表明热水在地下运移时间越长,可更新能力越差,文水地质环境越封闭,对铀矿的后期保存就越好。若$d\text{-}excess<-10‰$,则说明是干热气候条件下的降水;若$d\text{-}excess<10‰$,则说明是正常大气降水;若$d\text{-}excess>10‰$,则说明是与现今不同气候的降水(张人权,1978;苏艳等,2007)。

图 5 为棉花坑矿区地下热水 H—O 同位素的$d\text{-}excess$值分布图,其投点主要分布于 $7.5‰ \leqslant d\text{-}excess \leqslant 10.5‰$(平均值 9.3‰),表明区内地下热水均为现今气候条件下的正常大气降水补给形成的,同时亦表明该区地下热水可更新能力较强,水岩作用环境不封闭,还原作用相对较弱。这与区内储热层为硅化碎裂岩有着密切的关系,由于硅化碎裂岩的裂隙发育,地下热水的流动性好。

4.5　地下热水补给源高程估算

由上可知,矿区内地下热水为大气降水成因,主要通过深循环在地温作用下加热而成。若排除地下热水与围岩的水—岩作用,而矿区面积不大,纬度效应、大陆效应对地下热水 H—O 稳定同位素影响可忽略,那导致地下热水 H—O 同位素组成与地表水差异的主要因素可能就是下潜深度的不同——即高程效应,δD 和 $\delta^{18}O$ 值随地下水补给高程的增大而变小,由此可大致反推地下热水的补给源。由于热水中^{18}O 同位素在运移过程中容易发生漂移,因此补给高程计算采样氘同位素更为合适,推导公式及过程参考(张保建,2011;袁建飞,2013)。

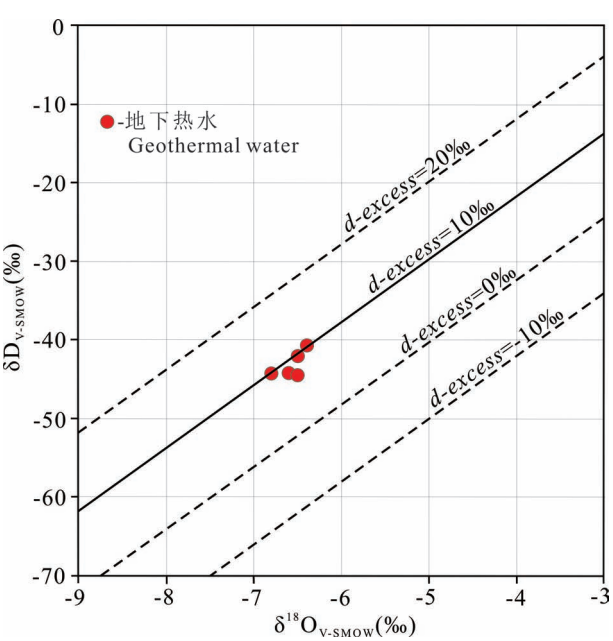


图 5 粤北仁化棉花坑矿区地下热水 δD—$\delta^{18}O$ 的$d\text{-}excess$值分布图

Fig. 5 Distribution map of *d-excess* value of geothermal water in the Mianhuakeng uranium deposit, Renhua, Northern Guangdong

棉花坑矿床深部地下热水 $\delta D_{V\text{-}SMOW}$ 值为 −44.5‰ ~ −40.7‰,地表水 $\delta D_{V\text{-}SMOW}$ 值 −33.7‰ ~ −27.4‰,地表水采样标高为 275~368 m。用该些数据计算得出,区内地下热水补给高程大致为海拔 650~1150 m。

结合长江矿区的地质构造特征、水源更新能力及补给区高程,推测其补给源可能是:沿棉花坑断裂 NE 向至南山周边的区域;或者是沿油洞断裂 SE 向至南山周边的区域(图 6)。但从棉花坑矿床深部钻孔揭露的热水孔分布来看,热水孔均分布于靠近棉花坑断裂的区域,因此其热水补给源区最有可能的是沿棉花坑断裂 NE 向至南山周边的区域。

4.6　地热成因与铀矿化的关系

地热能来自地热增温、岩浆活动或岩浆余热,以及放射性矿物蜕变释放热能等几个方面(王茜,2012)。

矿区岩石主要为印支期中粗粒二云母花岗岩(232±4 Ma)、燕山期中粒黑云母花岗岩(160±2 Ma)(黄国龙等,2010)以及燕山晚期细粒黑云母花岗岩(138.6±1.3 Ma)(徐文雄等,2014)及基性岩脉(110.6±2.0 Ma)(曹豪杰等,2013),而棉花坑矿床铀矿年龄为 70±11 Ma、60 Ma(黄国龙等,2010; Zhong Fujun et al., 2018),而岩浆活动的余热的最大时限为 10 Ma 左右,因此该区地下热水不可能来自岩浆活动或其余热。

棉花坑矿床所在的诸广岩体是华南典型的产铀花岗岩体,其岩体 U 含量为 13×10^{-6} ~ 24×10^{-6}(邓平等,2003),是一般花岗岩 U 含量的数倍,且已探明大量铀矿床,因此诸广岩体具有铀矿物放射性蜕变释放热能的基础,可增高岩体的地温梯度。

同时,地下水的深循环也是形成地热的一个主要因素。诸广岩体及周围发育大量 NE 向深大断裂,并形成规模较大的断陷盆地,如岩体周围分布有南雄盆地、丹霞盆地等,深大断裂切穿岩体深部为地

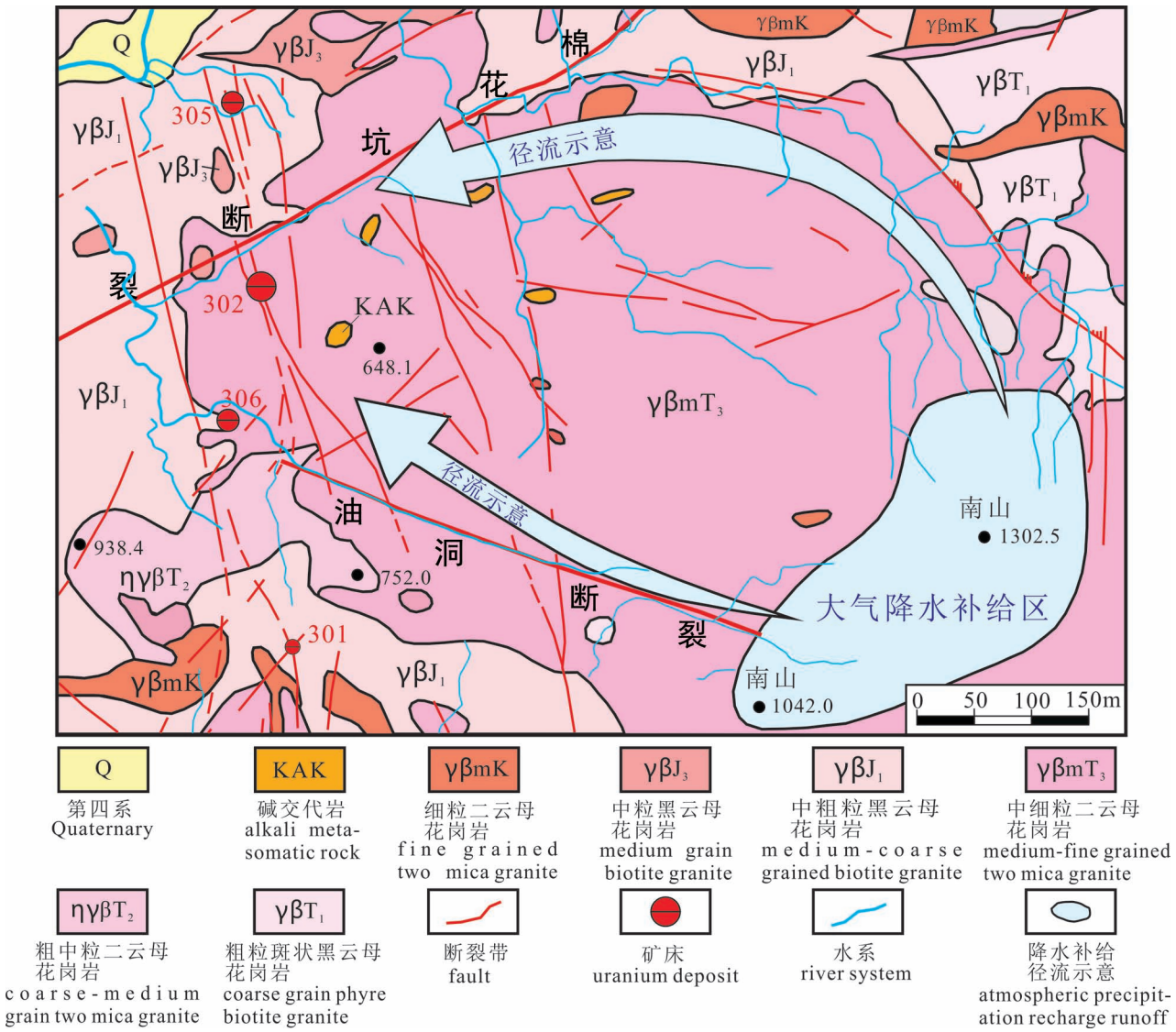


图 6 粤北仁化棉花坑矿区地下热水补给区径流示意模型图

Fig. 6 Model of runoff in geothermal water supplyin the Mianhuakeng uranium deposit, Renhua, Northern Guangdong

下水的深循环及放射性元素活化迁移提供通道和赋存空间,对地热的形成产生积极作用(万建军等,2015)。矿区棉花坑断裂为 NE 向压扭性深大断裂带,而近 SN 向含矿构造带与之相交,近矿围岩发育硅化—绿泥石化—绢云母化等蚀变,蚀变范围受构造控制,矿区地下热水的活动空间与 9 号构造蚀变带较为一致。而在其地下热水的化学成分中,地下热水的 U 含量为 40~120 μg/L,^{226}Ra 含量为 0.017~0.026 Bq/L;地下热水表现出较高的 U 含量及较低的^{226}Ra 含量,李学礼(1992)认为地下水在氧化环境中有利于 U 的富集,而在还原环境中有利于 Ra 的富集;因此可说明该矿床地下热水处于氧化环境,水—岩作用过程中可使岩体内的 U^{4+}转化为活泼的 U^{6+}而发生迁移;而现今的地下热水活动在一定程度上应是至该矿床成矿期以来古水热活动的延续地质事件(邵飞,2000),因而对铀矿的形成具有促进作用,这与江西邹家山铀矿床地下热水活动非常类似,该两矿床都属于华南超大型热液型铀矿床。

成矿期华南地区由 NW—SE 向挤压环境转变为拉张环境,沿 NE 向断裂带张裂形成深大断裂带及断陷盆地(如南雄盆地、丹霞盆地等),导致地壳深部热液上涌,而此时的构造导水性远比现在的好,地表形成的大气降水可快速下渗形成热水,当与深部流体逐渐混合后,形成高氧逸度、高萃取性的临界

流体,从围岩中捕获包括铀在内的各类元素形成成矿流体,随环境条件变化,最终在次级断裂带内形成铀矿床。

因此,棉花坑矿床的含矿构造带既是古热水的活动空间,也是铀矿沉淀的场所。而矿床现今的地下热水活动与古热水活动的继承性(均为同一含矿构造带内),对铀矿的保存具有促进作用,现今地下热水的循环深度(标高-1250~-660 m)可能就是棉花坑矿床的最大成矿深度,而该矿床目前只开采到-150 m 标高,勘探深度-400 m 标高,因此预测棉花坑矿床深部仍具有非常好的找矿前景。

5　结论

(1)棉花坑矿床地下热水属于 HCO_3^--Ca^{2+}-Na^+型水,富集 HCO_3^- 和 Na^+,矿化度为 144.80~309.00 mg/L,与区内地表水、泉水基本属于同一类型,但矿化度高 5~6 倍。

(2)棉花坑矿床地下热水 δD_{V-SMOW} 值为-44.5‰~-40.7‰,$\delta^{18}O_{V-SMOW}$ 值为-6.8‰~-6.4‰;地表水的 δD_{V-SMOW} 值为-30.1‰~-27.4‰,$\delta^{18}O_{V-SMOW}$ 值为-5.9‰~-5.3‰;均分布于本地雨水线附近。地下热水*d-excess*值为 7.5‰~10.5‰,地下热水的可更新能力较强,水岩作用环境不封闭,$\delta^{18}O$ 漂移不明显。

(3)棉花坑矿区地下热水的补给高程大致 650~1150m,根据矿区地质地貌情况,其水源补给最有可能来自于矿区东南方向的南山一带。地下热水平均热储温度为 67.8℃,最大循环深度为 959~1556 m,大致标高为-1250~-660 m,平均最大深循环标高为-950 m。

(4)由于受 NE 向棉花坑深大断裂及今 SN 向含矿构造的联合控制,矿区地下水深循环是形成地热主因,同时岩体铀矿物放射性蜕变产热可增强地温梯度;地下热水铀含量为 40~120 μg/L,呈氧化环境,现今的地下热水活动一定程度上继承了成矿期古热水活动特征对铀矿具有促进和保护作用,指示矿床深部仍具有非常好的找矿前景。

参　考　文　献　/　References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

曹豪杰,黄国龙,许丽丽,黄乐真,王小冬,吴建勇,王春双.2013.诸广花岗岩体南部油洞断裂带辉绿岩脉的 Ar-Ar 年龄及其地球化学特征.地质学报, 87(7):957~966.

陈慧广.2012.苏台德地区地下热水的水化学与放射性研究.导师:郑秀华. 北京: 中国地质大学(北京)硕士学位论文:1~82.

陈佑纬,毕献武,胡瑞忠,戚华文.2009.贵东复式岩体印支期产铀和非产铀花岗岩地球化学特征对比研究. 矿物岩石, 29(3):106~114.

邓平,舒良树,谭正中.2003.诸广-贵东大型铀矿聚集区富铀矿成矿地质条件. 地质论评,49(5):486~494.

杜乐天,王玉明.1984.华南花岗岩型、火山岩型、碳硅泥岩型、砂岩型铀矿成矿机理的统一性.放射性地质,3:1~10.

郝彦珍,潘明,吕勇,孙成杰.2014.云南昌宁柯街断裂带温泉水化学特征.地质科技情报, 33(4):196~201.

胡瑞忠, 毕献武, 彭建堂, 钟宏, 赵军红, 蒋国豪.2007. 华南地区中生代以来岩石圈伸展及其与铀成矿关系研究的若干问题. 矿床地质,26(2):139~152.

黄国龙,尹征平,凌洪飞,邓平,朱捌, 沈渭洲. 2010. 粤北地区 302 矿床沥青铀矿的形成时代、地球化学特征及其成因研究.矿床地质,29(2):352~360.

姜规模,吴群昌.2009.西安市地下热水资源可持续开发利用探讨.地质与资源, 18(3):210~215.

李大通.1988.核技术在水文地质中应用指南.北京:地质出版社:1~287.

李学礼.1992.江西温泉成因与铀矿化关系研究. 华东地质学院学报, 15(3):201~220.

李月湘,李田港,童航寿,冯明月,徐展.1995.201 富铀矿床氢、氧、碳、硫、铅同位素研究.铀矿地质,11(5):273~277.

凌洪飞,沈渭洲,邓平.2005.粤北下庄铀矿田鲁溪—仙人嶂辉绿岩脉的地球化学特征与成因. 地质学报,79(4):575~575.

马致远,王心刚,苏艳,余娟. 2008.陕西关中盆地中部地下热水 H、O 同位素交换及其影响因素.地质通报, 27(6):888~894.

闵茂中,张祖还,章邦桐.1993.华南花岗岩型铀矿床的成矿特征.核科学与工程,13(1):67~76.

蒲俊兵.2013.重庆岩溶地下水氢氧稳定同位素地球化学特征. 地球学报,34(6):713~722.

漆继红,许模,张强,覃礼貌,江凯,钱琳. 2008. 西藏盐井地区地下热水水化学特征差异分析. 成都理工大学学报(自然科学版),35(5):580~586.

祁家明,黄国龙,朱捌,伏顺成,许幼,叶松鑫. 2014. 粤北棉花坑铀矿床蚀变花岗岩副矿物特征研究.地质学报(中文版),9(88):1691~1704.

祁家明,罗春梧,黄国龙,曹豪杰,许丽丽. 2015. 粤北花岗岩型铀矿黄铁矿地球化学特征及对成矿流体的指示作用.铀矿地质,31(2):73~80.

苏艳,马致远,刘方,吴文悌,李峰,穆根胥,余娟,胡杨,贾旭兵. 2007. 西安、咸阳地下热水氚过量参数研究. 煤田地质与勘探, 35(3): 39~41.

商朋强,胡瑞忠,毕献武,刘雷,张国全.2006.花岗岩型热液铀矿床 C,O 同位素研究——以粤北下庄铀矿田为例.矿物岩石, 26(3):71~76.

商朋强,胡瑞忠,毕献武,刘雷,张国全. 2007.华南热液铀矿成矿作用若干问题探讨. 矿物岩石地球化学通报, 26(3): 290~294.

沈渭洲,凌洪飞,邓平,朱捌,黄国龙,谭正中. 2010. 粤北 302 铀矿床同位素地球化学研究.铀矿地质, 26(2): 80~87.

邵飞.2000.邹家山矿床低温热水成因及其与铀矿化关系. 华东地质学院学报,23(1):24~27.

万建军,孙占学,胡宝群,王安东,刘金辉,刘成东,陈功新,李小聪. 2015. 广东佛冈岩体放射性地球化学特征及其干热岩资源潜力研究. 东华理工大学学报(自然科学版),38(4):398~406.

王茜.2012.河南鲁山县五大温泉水文地球化学特征及成因模式.导师:周训.北京:中国地质大学(北京)硕士学位论文:1~59.

肖汉全.2009.川南地下热水资源研究及其开发利用.四川地质学报,29(2):180~182.

肖琼. 2012. 重庆三叠系碳酸盐岩热储成因与水—岩作用过程研究. 导师:袁道先.重庆:西南大学博士学位论文:1~115.

徐文雄,谭忠银,罗春悟,许丽丽,黄国龙.2014.棉花坑铀矿床花岗质脉岩地球化学特征及其与铀成矿的关系.铀矿地质,30(6):345~355.

尹观,倪师军.2001.地下水氚过量参数的演化.矿物岩石地球化学通报, 20(4):409~411.

余达淦. 1979. 燕山花岗岩演化与铀矿化富集——对华南一些含铀岩体成岩成矿关系探讨. 放射性地质,2:13~25.

袁建飞.2013.广东沿海地热系统水文地球化学研究. 导师:王焰新.北京:中国地质大学(北京)博士学位论文:1~119.

张保建.2011.鲁西北地区地下热水的水文地球化学特征及形成条件研究.导师:沈照理.北京:中国地质大学博士学位论文:1~120.

张保建,沈照理,乔增宝,亓麟.2009.聊城市东部岩溶地热田地下热水水化学特征及成因分析. 中国岩溶,(3):263~269.

张保建,徐军祥,马振民,沈照理,亓麟.2010.运用 H、O 同位素资料分析地下热水的补给来源——以鲁西北阳谷-齐河凸起为例. 地质通报,29(4):603~609.

张人权.1978.同位素方法在水文地质学中的应用. 北京:地质出版社:1~86.

Barragan R M. 2005. Isotopic ($\delta^{18}O$, δD) patterns in Los Azufres (Mexico) geothermal fluids related to reservoir exploitation. Geothermics. 34 (4): 527~547.

Cao Haojie, Huang Guolong, Xu Lili, Huang Lezhen, Wang Xiaodong, Wu Jianyong, Wang Chunshuang. 2013&. The Ar-Ar and geochemical characteristics of diabase dykes of the Youdong fault zone in south of Zhuguang granite pluton. Acta Geologica Sinica, 87 (7):957~966.

Chen Huiguang. 2012&. Studying on hydrochemistry and radioactivity of thermal ground waters in Sudety area. Supervisor: Zheng Xiuhua. Beijing: China University of Geosciences (M. D. Thesis): 1~82.

Chen Youwei, Bi Xianwu, Hu Ruizhong, Qi Huawen. 2009&. Comparison of geochemical characteristic of uranium and non-uranium bearing indosinian granites in Guidong composite pluton. J. Mineral. Petrol., 29(3):106~114.

Clark I D, Fritz P. 1997. Environmental Isotopes in Hydrogeology. New York: Lewis Publishers:1~328.

Deng Ping, Shu Liangshu, Tan Zhengzhong. 2003&. The geological setting for the formation of rich uranium ores in Zhuguang—Guidong large-scale uranium metallogenetic area. Geological Review,49(5): 486~494.

Dilsiz C. 2005. Conce Ptual hydrodynamic model of the Pamukkale hydrothermal field, southwestern Turkey, based on hydrochemical and isotopic data. Hydrogeology Journal, 14(4):562~572.

Dos Santos Jr, Rossetti, Murray. 2007. Origins of the Rio Capim kaolinites (northern Brazil) revealed by $\delta^{18}O$ and δD analyses. Applied Clay Science, 37(3~4):281~ 294.

Du Letian, Wang Yuming. 1984#. Unification of metallogenic mechanism of granite-type, volcanic-type, carbosiliceous—mudstone-type and sandstone-type uranium deposits in South China. Radioactive Geology,3:1~10.

Giggenbach W E.1988. Geothemal solute equilibria Derivation of Na—K—Mg—Ca geoindicators. Geochimica et Cosmochimica Acta,52: 2749~2765.

Hao Yanzhen, Pan Ming, Lv Yong, Sun Chengjie. 2014&. Hydrochemical features of the hot spring in Kejie fault, Changning, Yunnan. Geological Science and Technology Information, 33(4): 196~201.

Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Peng Jiangtang, Zhong Hong, Zhao Junhong, Jiang Guohao. 2007&. Some problems concerning relationship between Mesozoic Cenozoic lithospheric extension and uranium metallogenesis in South China. Mineral Deposits,26(2):139~152.

Huang Guolong, Yin Zhengping, Ling Hongfei, Deng Ping, Zhu Ba, Shen Weizhou. 2010&. Formation age, geochemical characteristics and genesis of pitchblende from No.302 uranium deposit in northern Guangdong. Mineral Deposits,29(2):352~360.

Jiang Guimo, Wu Qunchang. 2009&. Study on the sustainable development and utilization of geothermal water resources in Xi'an city. Geology and Resources, 18(3):210~215.

Larsen D, Swihart G H, Xiao Y K. 2001. Hydrochemistry and isotope composition of springs in the Tecopa Basin, southeastern California, USA. Chemical Geology.179:17~35.

Li Datong. 1988#. Guidelines for the application of nuclear technology in hydrogeology. Beijing: Geological Publishing House:1~287.

Li Xueli. 1992&. Study on the relationship between Jiangxi hot-spring genesis and uranium mineralization. Journal of East China Geologcal Institute, 15(3):201~220.

Li Yuexiang, Li Tiangang, Tong Hangshou, Feng Mingyue, Xu Zhan. 1995&. A study on hydrogen, oxygen, carbon, sulfur and lead isotopes in the rich uranium deposit No.201. Uranium Geology, 11 (5):273~277.

Ling Hongfei, Shen Weizhou, Deng Ping. 2005 #. Geochemical characteristics and genesis of Luxi—Xianrenzhang diabase dike in Xiazhuang Uranium Orefield, Northern Guangdong province. Acta Geologica sinica (English edition),79(4):575~575.

Ma Zhiyuan, Wang Xingang, Su Yan, Yu Juan. 2008&. Oxygen and hydrogen isotope exchange and its controlling factors in subsurface geothermal waters in the central Guanzhong basin, Shaanxi, China. Geological Bulletin of China,27(6):888~894.

Marfia A M, Krishnamurthy R V, Atekwana E A, Panton W F. 2003. Isotopic and geochemical evolution of ground and surface waters in a karst dominated geological setting: a case study from Belize, Central America. Applied Geochemistry,19(6): 937~946.

Min Maozhong, Zhang Zhuhuan, Zhang Bangtong. 1993&. Mineralization features of the granite-type uanium deposits in southern China. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 13(1):67~76.

Pastorelli S, Marini L, Hunziker J. 2001. Chemistry, isotope values (δD, $\delta^{18}O$, $\delta^{34}S_{SO4}$) and temperatures of the water inflows in two Gotthard tunnels, Swiss Alps. Applied Geochemistry. 16(6):633~649.

Pu Junbing. 2013&. Hydrogen and oxygen isotope geochemistry of karst groundwater in Chongqing. Acta Geoscientica Sinica,34(6):713~722.

Qi Jiaming, Huang Guolong, Zhu Ba, Fu Shuncheng, Xu You, Ye Songxin. 2014&. Compositions Study of auxiliary minerals in altered granitic rocks of the Mianhuakeng uranium deposit in northern Guangdong. Acta Geologica Sinica (Chinese edition),9(88):1691~1704.

Qi Jiaming, Luo Chunwu, Huang Guolong, Cao Haojie, Xu Lili. 2015&. Geochmical character of pyrite and its tracing effects to ore-forming fluid for granite type uranium deposit in north Guangdong. Uranium Geology,31(2):73~80.

Qi Jihong, Xu Mo, Zhang Qiang, Qing Limao, Jiang Kai, Qian Lin.

2008&. An analysis of the hydrogeochemical characteristics for the hot underwater in Yanjing of Tibet, China. Journal of Chengdu University of Technology (Science & technology edition), 35(5): 580~586.

Shang Pengqiang, Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Liu Lei, Zhang Guoquan. 2006&. Study on carbon and oxygen isotopes in granite-type hydrothermal uranium deposits: a case of the Xiazhuang uranium ore field in northern Guangdong. J Mineral Petrol, 26(3):71~76.

Shang Pengqiang, Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Liu Lei, Zhang Guoquan. 2007&. Discussion of some problems on the hydrothermal uranium mineralization in south China. Bullet in Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 26(3): 290~294.

Shao Fei. 2000&. Genesis of low-thermal water and its relation with uranium mineralization in Zhoujiashan deposit. Journal of East China Geological Institute, 23(1):24~27.

Shen Weizhou, Ling Hongfei, Deng Ping, Zhu Ba, Huang Guolong, Tan Zhengzhong. 2010&. Study on isotope geochemistry of uranium deposit 302 in northern Guangdong province. Uranium Geology, 26 (2): 80~87.

Su Yan, Ma Zhiyuan, Liu Fang, Wu Wenti, Li Feng, Mu Genxu, Yu Juan, Hu Yang, Jia Xubing. 2007&. Deuterium excess parameter features study on thermal groundwater of Xi'an and Xianyang. Coal Geology & Exploration, 35(3): 39~41.

Wan Jianjun, Sun Zhanxue, Hu Baoqun, Wang Andong, Liu Jinhui, Liu Chengdong, Chen Gongxin, Li Xiaocong. 2015&. Radiogenic geochemistry investigation on granitic rocks from Fogang complex, northern Guangdong province and its implications for hot dry rock resource. Journal of East China Institute of Technology (Natural science), 38(4):398~406.

Wang Qian. 2012&. Hydrogochemical characteristics and formation mode of the five thermal springs in Lushan county, Henan. Supervisor: Zhou Xun. Beijing: China University of Geosciences (M. D. Thesis):1~59.

Xiao Hanquan. 2009&. On utilization of geothermal resources in south Sichuan. Acta Geologica Sichuan, 29(2):180~182.

Xiao Qiong. 2012&. Water—rock interaction and genesis of thermal groundwater in Carbonate reservoir in Chongqing. Supervisor: Yuan Daoxian. Chongqing: Southwest University (Ph. D. Thesis):1~115.

Xu Wenxiong, Tan Zhongyin, Luo Chunwu, Xu Lili, Huang Guolong. 2014&. Geochemical characteristic and ore-forming geological significance of fine crystalline granite in Mianhuakeng uranium deposit, northern Guangdong. Uranium Geology, 30(6):345~355.

Yin Guan, Ni Shijun. 2001&. Deuterium excess parameter evolution in ground water. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 20(4): 409~411.

Yu Dagan. 1979 #. Evolution of Yanshan granite and uranium mineralization enrichment: Discussion on diagenesis and mineralization of some uranium-bearing rocks in South China. Radioactive Geology, 2:13~25.

Yuan Jianfei. 2013&. Hydrogeochemistry of the geothermal systems in coastal areas of Guangdong province, south China. Supervisor: Wang Yanxin. Beijing: China University of Geosciences (Ph. D. Thesis):1~119.

Zhang Baojian. 2011&. Hydrogeochemical characteristics and formation conditions of geothermal water in northwestern Shandong province. Beijing: China University of Geosciences (Ph. D. Thesis):1~120.

Zhang Baojian, Shen Zhaoli, Qiao Zengbao, Qi Lin. 2009&. Analysis on hydro-chemical features and origin of the hot spring in Karst geothermal field, east Liaocheng city. Carsologica Sinica, (3):263~269.

Zhang Baojian, Xu Junxiang, Ma Zhenmin, Shen Zhaoli, Qi Lin. 2010&. Analysis on groundwater supply sources using hydrogen and oxygen isotope data: a case study of Yanggu—Qihe salient, northwestern Shandong, China. Geological Bulletin of China, 29 (4):603~609.

Zhang Renquan. 1978&. Application of isotope method in hydrogeology. Beijing: Geological Publishing House:1~86.

Zhong Fujun, Pan Jiayong, Qi Jiaming, Yan Jie, Liu Wenquan, Li Haidong. 2018. New in-situ LA-ICP-MS U-Pb ages of uraninite from the Mianhuakeng uranium deposit, northern Guangdong province, China: constraint on the metallogenic mechanism. Acta Geologica sinica (English edition). 92(2):852~854.

Study on Hydrogeochemical and Recharge Sources Characteristics of Geothermal Water in the Mianhuakeng Uranium Deposit, Renhua, Northern Guangdong

QI Jiaming, YE Songxin, FANG Xiaoqi, CAO Haojie, TANG Shiyao

Research Institute No. 290, *CNNC. Shaoguan, Guangdong*, 512026

Objectives: The paper has discussed the formation environment and recharge source of geothermal water, based on the analysis of hydrogeochemical and geological conditions in the Mianhuakeng Uranium Deposit, Northern Guangdong.

Methods: This paper was based on the methods of hydrochemical analysis, H—O isotope analysis and comprehensive study of water samples.

Results: The geothermal water type was HCO_3^-—Ca^{2+}—Na^+, and δD_{V-SMOW} ranged −44.5‰ ~ −40.7‰, $\delta^{18}O_{V-SMOW}$ ranged −6.8‰ ~ −6.4‰, distributed near the local rainwater line which was caused by atmospheric precipitation. The water had strong renewability, short runoff distance and weak water—rock effect, which thermal

storage temperature was 67.8℃, recharge source altitude 650 ~ 1150 m, circulation depth altitude −1250 ~ −660 m, and *d-excess* value ranged 7.5‰ ~ 10.5‰ The uranium content which was 40 ~ 120 μg/L indicated that the geothermal water was formed in an oxidizing environment.

Conclusions: The recharge source was come from Nanshan area which was located in southeast of the deposit, according to the geological and geomorphologic characteristics of granite area in northern Guangdong. The groundwater depth recycle was the main reason of geothermal formation. To some extent, the present geothermal water activity has inherited the characteristics of the paleo hot water during the metallogenic period, which had a promoting effect on the formation of uranium deposit. The depth recycle of the geothermal water has indicated that there was a very good prospecting potential in the depth of the deposit.

Keywords: hydrochemistry; H—O isotopes; geothermal water; uranium deposit No. 302; Mianhuakeng, Renhua, North Guangdong

Acknowledgements: This study was supported by *National Important Mineral Concentration Area Prospecting and Prediction Project* (No. DD2016005209), *Centralized Research and Development Project of CNNC* (No. LTD1602) and *Scientific Research Project of China Nuclear Geological Bureau* (No. 201486, 201641)

First author: QI Jiaming, male, born in 1987, master, engineer, mainly engaged in uranium exploration and scientific research, Email: jiaming_qi@126.com

Corresponding author: YE Songxin, male, born in 1983, engineer, mainly engaged in uranium exploration and management, Email: 125382647@qq.com

Manuscript received on: 2018-07-14; Accepted on: 2018-12-13; Edited by: ZHANG Yuxu

Doi: 10.16509/j.georeview.2019.01.013